

遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机设计与试验

张青松^{1,2} 陈志凌¹ 杜文斌¹ 杨锦鹏³ 廖庆喜^{1,2} 杨春雷³

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070;

3. 湖北省烟草科学研究院, 武汉 430030)

摘要: 针对雪茄烟叶在旺长期及成熟期因植株高大及叶片生长致使烟田垄间空间小,且雪茄烟叶生产对烟叶色泽及完整度要求高,田间管理要求不能损伤烟叶,导致生产中雪茄烟叶植株中下层烟叶植保困难的问题,结合烟叶植株生长特征,设计了一种遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机,该装置主要包括喷雾系统、履带底盘及控制系统,可实现装置在烟田垄间遥控行走、中下层烟叶喷雾及路况可视等功能。为获取烟株生长特征,运用三维激光扫描仪对其进行扫描并建立了植株叶片田间空间分布模型;根据烟叶田间分布特征,确定装置总体结构和工作方式;结合烟叶形态特征和植保农艺要求,对喷雾系统进行了结构设计及分析,确定了参数范围;根据田间作业需求,对履带底盘进行了动力学分析,对控制系统进行了设计。开展了场地试验,利用 Box - Behnken 优化了喷雾系统参数,当喷雾压力为 0.65 MPa、喷嘴夹角为 20.4°、喷嘴孔径为 0.4 mm 时,经垂直雾滴分布测量仪模拟雪茄烟叶叶片层垂直方向的药液附着性能试验表明,雾滴沉积量垂直分布满足雪茄烟叶植保要求。田间试验结果表明,雪茄植株中下层烟叶正面药液覆盖率为 52% ~ 83%,背面药液覆盖率为 22% ~ 45%,可实现雪茄植株中下层烟叶药液的有效喷洒。

关键词: 雪茄烟叶; 喷雾机; 履带底盘; 遥控自走式; 喷雾系统; 田间试验

中图分类号: S224.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)01-0122-12

OSID:



Design and Experiment of Novel Sprayer for Protecting Middle and Lower Leaves of Cigar Tobacco Plants

ZHANG Qingsong^{1,2} CHEN Zhiling¹ DU Wenbin¹ YANG Jinpeng³ LIAO Qingxi^{1,2} YANG Chunlei³

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China

3. Tobacco Research Institute of Hubei Province, Wuhan 430030, China)

Abstract: Aiming at the problem that the space between ridges in cigar tobacco fields is small due to the tall plants and the growth of leaves, and the production of cigar tobacco leaves requires high color and integrity of tobacco leaves, and the field management requirements cannot damage tobacco leaves, which leads to the difficulty in plant protection of middle and lower tobacco leaves in cigar tobacco plants during production. Combined with the growth characteristics of tobacco leaves, a plant protection device for middle and lower layers of tobacco leaves in cigar plants was designed. The device mainly consisted of a spray system, a crawler chassis and a control system and other functions. In order to obtain the growth characteristics of tobacco plants, a three-dimensional laser scanner was used to scan them and establish a spatial distribution model of plant leaves in the field. According to the distribution characteristics of tobacco leaves in the field, the overall structure and working mode of the device were determined; combined with the tobacco leaf shape characteristics and plant protection and agronomic requirements, the structure design and analysis of the spraying system were carried out, and the parameter range was determined. According to the requirements of field operations, the dynamic analysis of the crawler chassis and the design of the control system were carried out. The field experiments was carried out, and the parameters of the spray system were optimized by using Box - Behnken. When the spray pressure was 0.65 MPa, the nozzle angle was 20.4°, and the nozzle aperture was 0.4 mm, the vertical direction of the

收稿日期: 2023-06-02 修回日期: 2023-08-07

基金项目: 中国烟草总公司重大专项(110202101059(XJ-08))和湖北省烟草公司科技项目(027Y2021-006)

作者简介: 张青松(1987—),男,副教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究, E-mail: qszhang@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 杨春雷(1967—),男,研究员,主要从事烟草栽培与调制技术研究, E-mail: ycl193737@163.com

cigar leaf layer was simulated by the vertical droplet distribution measuring instrument. The liquid adhesion performance test showed that the vertical distribution of droplet deposition met the requirements of cigar tobacco leaf plant protection. The field experiments results showed that the coverage rate of the liquid medicine on the front side of the middle and lower layers of the cigar plant was 52% ~ 83% , and the coverage rate of the backside was 22% ~ 45% , which can realize the effective spraying of the liquid medicine on the middle and lower layers of the tobacco leaves of the cigar plant.

Key words: tobacco leaves; sprayer; crawler chassis; remote control self-propelled; spray system; field experiments

0 引言

雪茄烟叶是晾烟的一种,国内种植主要分布于湖北、四川、海南等山区丘陵地带^[1-3],种植地块的特殊性及面积普遍较小导致了大型机械无法下地作业。作为以叶片为主的经济作物,为满足叶片完整度高的要求,在大田生产过程中,为避免病虫害等,需要多次对雪茄烟叶进行田间管理作业。生产中,雪茄烟叶在旺长期至成熟期,因植株高大及叶片生长逐渐封行,叶片茂密且相互遮挡覆盖导致人工施药工作量大且易损伤叶片;同时田间烟株间积温高,易造成人员中毒中暑,而无人机喷药难以到达雪茄植株中下层烟叶,导致雪茄烟叶植株中下层叶片植保困难的难题制约了雪茄烟叶种植生产效益。为解决丘陵山区雪茄烟叶中下层植保难题,需要研制一种可满足植保要求的田间管理装置。

近年来国内外学者针对高大作物、一般作物、低矮作物植保机械化开展了大量研究。苑进等^[4]设计了一种高地隙喷杆式与隧道式一体喷雾机。能够实现烟叶从幼苗期到成熟期全过程施药作业。樊桂菊等^[5]设计一种多气流协同式 V 形防飘喷雾装置。姜红花等^[6-7]设计了一种履带自走式果园自动对靶风送喷雾机和一种果园多风管风送喷雾机风量调控系统。李建平等^[8]设计一种风机对称布置的新型果园多风机风送喷雾机。周良富等^[9-10]设计了牵引式双气流辅助静电果园喷雾机和可根据果树外形来调节喷雾位置的组合圆盘式果树风送喷雾机。ENDALEW 等^[11]对双风扇空气辅助喷雾器进行了 CFD 模拟研究。PARTEL 等^[12]设计并评估了一种低成本的智能传感系统,用于控制喷枪式树木作物喷雾器。喷雾机在工况极其恶劣的田间地表工作,地面高低不平、土壤黏附等问题均会影响装置作业效果,需设计稳定性和通过性好的底盘。CHEN 等^[13]提出了一种自走式热雾机履带底盘,对牵引、转向和越障性能进行分析。王伟等^[14]设计了一种履带式玉米行间喷雾机,并对底盘驱动力进行分析。刘路等^[15]设计了一种针对烟草施药的小型轮式移动平台。沈跃等^[16]设计了一种四轮独立电驱

动自转向电动底盘,在水田泥泞环境下仍具有良好的通过性。

为解决丘陵山区雪茄烟叶旺长期至成熟期植保困难的问题,本文结合雪茄烟叶生产农艺要求和株型特征,设计一种遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机,通过遥控移动喷施药液的方式工作,以期实现雪茄烟叶植株中层及以下叶片药液有效覆盖沉积。

1 烟叶植株三维特征

1.1 试验仪器与方法

为获得雪茄烟叶植株田间生长三维特征,在湖北省丹江口市优质雪茄烟叶原料生产基地采用 Trimble TX8 3D 型三维激光扫描仪对雪茄烟叶植株开展三维扫描。其中 Trimble TX8 3D 型三维激光扫描仪可以在每秒获取 1×10^6 个精确激光点速度下,获得高密度的三维点云数据。

由于烟叶植株在大田生长时,相邻植株间相互遮挡无法获取完整的烟叶植株叶片云点数据,为获取完整的烟叶植株叶片田间空间分布模型,扫描包括田间整行植株扫描及室内单株扫描。烟叶植株选取在大田生长的 CX-14 品种雪茄植株旺长期烟叶为试验对象,其中烟叶植株田间整行扫描和室内单株扫描如图 1 所示。

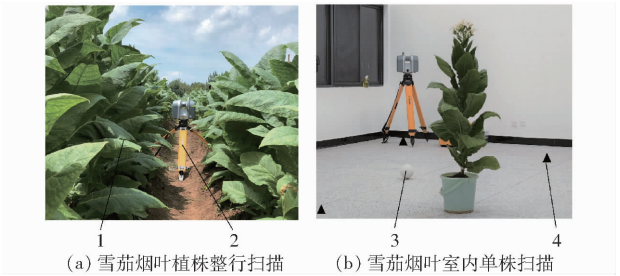


图 1 雪茄烟叶植株三维扫描

Fig.1 Three-dimensional scanning of cigar tobacco plants
1. 雪茄烟叶 2. 激光扫描仪 3. 标靶球 4. 测站

1.2 植株三维特性

烟叶植株扫描点云数据,采用 Trimble TX8 3D 型三维激光扫描仪配套软件 Trimble Realworks Survey 进行处理,采用 ICP 算法将扫描得到的多站原始点云数据配准到同一坐标系下。点云数据处理过程包括

配准、去除地面点、降噪、重取样,对处理后的点云数据三角网格化及逆向建模,最终得出雪茄烟叶单株模型和植株叶片田间分布模型,如图 2 所示。

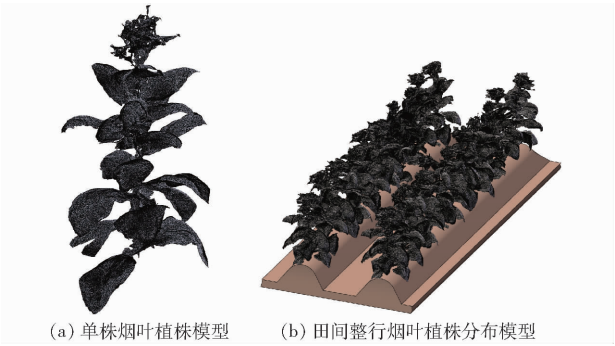


图 2 雪茄烟叶植株三维模型

Fig.2 3D modeling of cigar tobacco plant

对雪茄烟叶单株模型及田间整行烟叶植株分布模型进行统计分析,如图 3 所示。得出田间垄高 H_0 为 300 mm,雪茄烟叶植株高度 H_1 为 1 600 ~ 1 700 mm;垄沟宽度 L_2 为 500 mm,垄距 L_3 为 1 200 mm,叶柄角 θ 为 $28.16^\circ \sim 78.38^\circ$,随着叶片层数从下至上线性递减,单株雪茄烟叶植株呈近似纺锤形,叶尖距 L 最大为 362.71 mm,邻近植株间叶片最小距离 L_1 为 474.58 mm,遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机需满足喷雾高度 H 为 900 mm 以上。

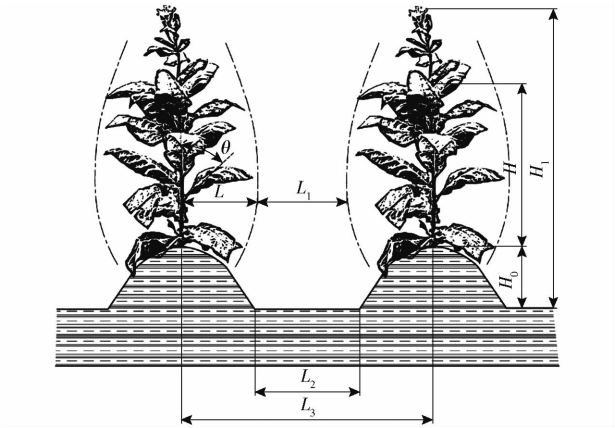


图 3 田间烟叶植株生长特征

Fig.3 Parameters of characteristics of tobacco-growing in field

2 总体结构与工作过程

2.1 总体结构

根据田间烟叶植株生长特征,对遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机进行设计,其结构主要由环形喷雾系统、行走底盘、控制系统组成。如图 4 所示,其中环形喷雾系统包括药箱、隔膜泵、球阀、压力表、T 形三通接头、管道、喷嘴等,行走底盘包括机架、履带、驱动轮、从动轮、负重轮、张紧螺栓、减速器、驱动电机等,控制系统包括 Arduino 单片机

中央控制器、遥控器、电机驱动器、电机、摄像头、图传发射机、显示器及电压模块等。

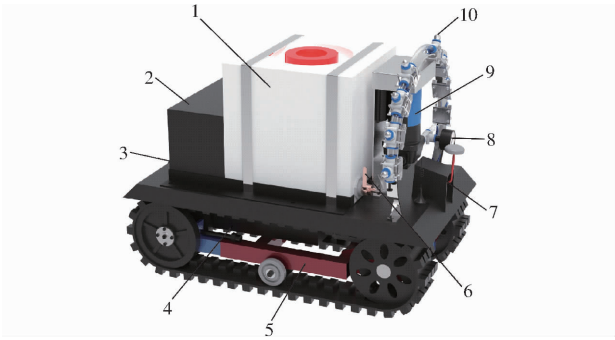


图 4 遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机结构示意图

Fig.4 Schematic of sprayer for protecting middle and lower tobacco

1. 药箱 2. 电池 3. 摄像头 4. 电控箱 5. 履带底盘 6. 球闸
7. 图传发射机 8. 压力表 9. 隔膜泵 10. 喷嘴

电池、药箱、泵及环形喷雾组件固定在行走底盘机架上方,摄像头安装于装置前方,图传发射机安装于装置后方。药箱通过管道连接泵,泵受中央控制系统控制,通过调节其输出功率,将药液输送至各个喷嘴处;两个电机受中央控制系统控制,传递动力至驱动轮进而带动从动轮、负重轮、履带运动,控制小车前进后退,差速转向,张紧螺栓及螺母可以调节驱动轮和从动轮间距离实现张紧履带。该机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 装置主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of sprayer

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	780×420×600
整机质量/kg	80
整机额定功率/kW	1
最大爬坡度/(°)	30
转弯半径/m	0.5
作业速度/(km·h ⁻¹)	2~3
药箱容积/L	30
作业幅宽/m	1.2
续航时间/h	3
作业效率/(hm ² ·h ⁻¹)	0.24~0.36

2.2 工作过程

遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机田间植保作业时,操作人员可通过遥控器同时控制行走系统、喷雾系统、可视化系统的工作,实现对遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机行走姿态调整、农药喷施、路况监视功能。其中喷雾系统可通过控制遥控器上的喷雾调节旋钮控制电动隔膜泵工作功率,从而达到控制喷雾压力和流量目的;喷雾系统中压力表实时显示管路压力。待装置进入雪茄烟田

深处导致操作人员无法确定装置位置时,可通过打开遥控器上路况监视开关,进一步打开前置摄像头,通过显示器实时观察车体前方路况,便于操作人员及时调整车体姿态,如图 5 所示。

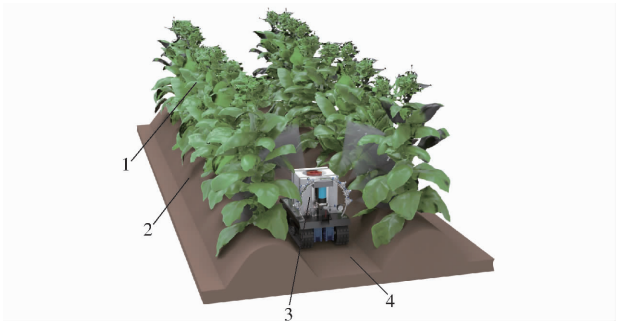


图 5 遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机田间作业示意图

Fig. 5 Process program of sprayer spraying middle and lower tobacco leaves

1. 烟叶植株 2. 垄台 3. 机具 4. 垄沟

3 关键部件设计

3.1 喷雾系统设计

装置作业时,药液在泵压作用下经喷嘴的喷孔喷出,形成锥形液膜,在空气冲击力作用下破碎成大量细小且均匀的雾滴^[17]。结合雪茄烟叶生长特点和植保要求,设计合理的喷嘴布局,选用合适的喷嘴和泵,以确保雾滴有效覆盖雪茄烟植株中层及下层叶片,防止漏喷。

3.1.1 喷嘴布局设计

根据前期株型几何研究,单株雪茄烟叶的整体形态近似为纺锤型。国内有研究表明环形喷雾机在针对纺锤型果树植保作业后中下层叶片药液覆盖和沉积效果显著^[18]。遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机采用环形喷杆喷雾作业,图 6 为单侧“机具-烟叶”配置方案。为避免伤叶,同时保证喷

洒高度范围,结合前文植株三维特性分析和雪茄烟叶大田种植农艺要求,环形喷杆圆心 O 到喷嘴末端距离 d_0 需小于 237.5 mm,考虑喷嘴长度和底座高度,最终确定环形喷杆半径 R 为 210 mm,设计采用 8 个喷嘴对称布局。

本研究的 8 个喷嘴均匀分布在机具两侧,为防止产生漏喷,并保证喷雾作业喷幅和雾滴覆盖高度达到雪茄烟叶喷雾要求,根据几何关系,需满足

$$\begin{cases} d_0 \sin \frac{\beta}{2} \csc \frac{\zeta - \beta}{2} \leq d_1 \\ (d_0 + R_s) \sin(3\beta) + 2R_s \sin \frac{\zeta}{4} \cos \left(\frac{\zeta}{4} + 3\beta \right) \geq H_a \\ \zeta - \beta \geq 0^\circ \\ \frac{\zeta}{4} + 3\beta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (1)$$

式中 d_1 ——喷嘴到雪茄烟叶主茎距离,mm
 β ——喷嘴位置夹角, $^\circ$
 ζ ——雾锥角, $^\circ$
 R_s ——单个喷嘴喷雾射程,mm
 H_a ——端头喷嘴距喷雾最高点距离,mm

机具中心距离雪茄烟叶主茎 d_2 为 600 mm,喷嘴距离烟叶主茎 d_1 为 315 mm,水平方向喷嘴距喷雾最高点距离 H_a 为 835 mm 以上,代入式(1),得喷嘴间夹角 β 在 $19^\circ \sim 23^\circ$ 之间,单个喷嘴射程 R_s 大于 600 mm,雾锥角 ζ 大于 40° 。为避免相邻喷雾之间重叠过多导致药液浪费,雾锥角 ζ 尽可能小。

喷雾机所用单个喷头流量计算式为

$$q_i = \frac{60 Q_i B v}{10\,000 N_1} \quad (2)$$

式中 Q_i ——雪茄烟叶用药量, L/hm^2
 q_i ——单个喷嘴流量, L/min
 B ——机具作业幅宽,m
 N_1 ——喷嘴数目
 v ——机具前进速度, m/s

根据农艺要求,雪茄烟叶植株植保时,需用药量为 $150 \sim 225 L/hm^2$,机具工作宽度为 1.2 m,作业速度为 0.6 m/s,代入式(2)得单个喷嘴流量为 0.08 ~ 0.12 L/min。采用广东博原喷雾科技有限公司锥形雾喷嘴,喷嘴孔径为 0.3 ~ 0.5 mm,喷雾压力为 0.4 ~ 0.8 MPa。

3.1.2 喷嘴流量均匀性

为验证 8 个喷嘴的流量分布均匀性,喷雾系统可简化为沿程泄流多孔管问题,沿程孔口有液体流出,管内液体属于变质量流动^[19]。如图 7 所示,将隔膜泵提供的压力简化为恒定压力水头,1 ~ 8 为喷

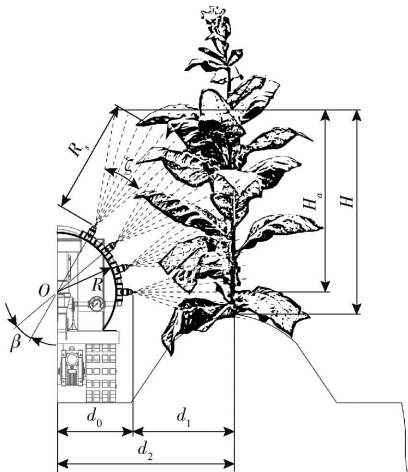


图 6 喷雾机作业示意图

Fig. 6 Schematic of sprayer operation

嘴出口序号, $q_1 \sim q_8$ 为对应喷嘴处流量。

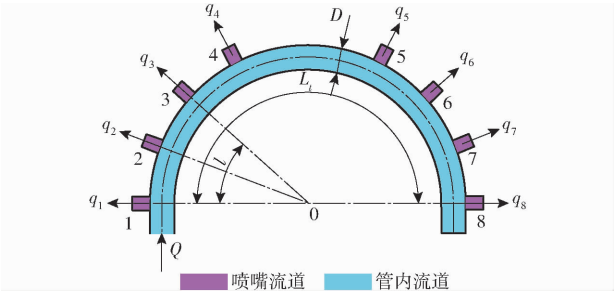


图 7 流道及出口示意图

Fig. 7 Schematic of runner and outlet

根据 RAVIKUMAR 等^[20]的研究结果,各出口处流量变异系数计算式为

$$C_{VQ} = \frac{\alpha}{H} \sqrt{827 \Delta H^2 + 833 (L_g S)^2 - 1\,540 k \Delta H L_g S} \times 100\%$$

其中

$$\bar{H} = h - 0.733 \Delta H + \frac{k L_g S}{2}$$

$$\Delta H = \frac{7.89 \times 10^5 Q^{1.75} L_g}{2.75 D^{4.75}} \quad Q = \xi h^\alpha$$

- 式中
- ΔH ——管路总摩擦阻降, m
- Q ——喷雾系统流量, L/s
- L_g ——管道长度, mm
- h ——过水断面 0-1 处微小流束位置势能, m
- D ——管道直径, mm
- C_{VQ} ——喷嘴流量变异系数, %
- α ——流态系数
- S ——管道坡度, %
- k ——特定值, 上坡取 1, 下坡取 -1
- $\bar{H}$ ——管内流道平均位置势能, m
- ξ ——喷嘴流量系数

喷嘴对称布置, 喷杆半径 R 为 210 mm, 入口处压力为 0.4 ~ 0.8 MPa, 喷雾系统流量 Q 为 0.010 7 ~ 0.016 L/s, 管道直径 D 为 8 mm, 代入式(3)中计算得喷嘴流量变异系数 C_{VQ} 为 0.15%, 表明喷雾系统压力和流量在各个喷嘴处的沿程损失小, 满足田间作业要求。

3.1.3 喷雾系统流量控制

电动隔膜泵具有结构紧凑、体积小、工作效率高、易驱动等优点, 使用范围广泛。遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机的喷雾系统采用脉宽调制(Pulse width modulation, PWM)直流调速技术, 通过调节占空比改变输入隔膜泵平均电压从而控制隔膜泵中直流电机转速, 达到调节流量目的^[21]。图 8 为 PWM 调速控制输出电压波形图, 直流电机两端电压平均值为

$$U_A = \frac{t_1}{t_1 + t_2} U_D = \frac{t_1}{T} U_D = \tau U_D \tag{4}$$

式中

U_A ——直流电机两端平均电压, V

t_1 ——电流导通时间, s

t_2 ——电流断开时间, s

T ——开关周期, s

U_D ——加在电机两端矩形波幅值电压, V

τ ——占空比, 取 0 ~ 1

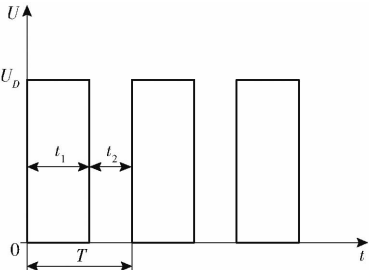


图 8 PWM 调速控制输出电压波形图

Fig. 8 Output voltage waveforms of PWM velocity modulation control

在工作过程中, 隔膜泵为喷雾系统提供稳定的压力与流量, 同时为防止药剂在药箱底部沉淀, 部分流量将回流至药箱, 对于药箱内的药液进行搅拌^[22]。则隔膜泵流量为

$$Q_g \geq q_i N_1 + V_b K \tag{5}$$

式中

Q_g ——隔膜泵流量, L/min

V_b ——药箱容量, L

K ——药液搅拌系数, 取 0.15

药箱容量为 30 L, 代入式(5)得 $Q_g \geq 5.46$ L/min, 选用福建国江新能源电器有限公司生产的 DP-160 型微型隔膜泵。

3.2 履带底盘行走系统设计

履带底盘具有负重能力强、接地比压小、附着性能佳、转弯半径小、越野性能强等优点^[16]。由于遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机作业时, 雪茄烟叶种植垄间空间狭窄, 为避免机具尺寸过大导致通过性不佳, 装置选用履带底盘, 同时要求底盘宽度不超过垄沟宽, 高度不超过垄高, 根据雪茄烟叶苗床特性, 设计履带底盘宽度为 420 mm, 高度为 265 mm。

遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机在田间作业时需保证在田间起伏地表上的通过性和操控灵活性, 需针对底盘在极端条件下的驱动力进行分析。图 9 为底盘在斜面转向的受力示意图, O_1 、 O_2 分别为内外履带几何中心, O' 为机具转向时瞬心, C 为履带底盘的转向重心。

为了明确建立起田间作业时驱动轮上速度、力和力矩之间的关系式, 首先确定以下初始条件: 喷雾机在斜面上转向; 转向时速度不变; 地面对履带的反

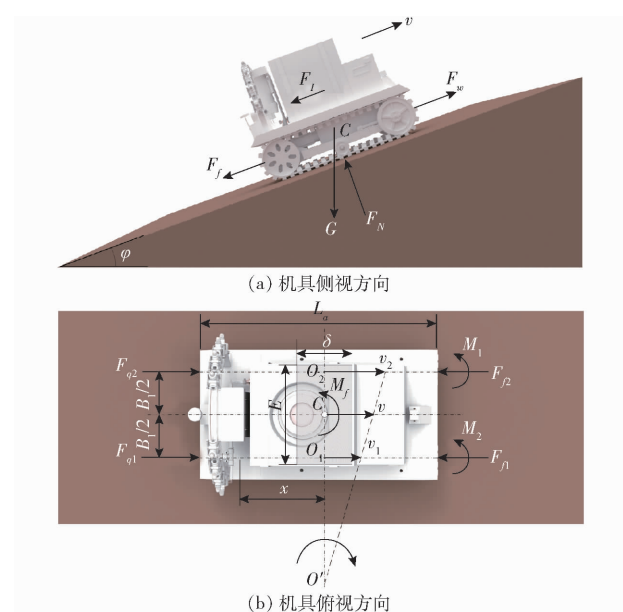


图 9 履带斜面转向受力示意图

Fig. 9 Slope steering force diagrams

作用力均布在其接地长度范围内;不考虑离心力作用。喷雾机底盘重心位于履带接地平面核心区域以内,阴影区域的长和宽分别代表横向和纵向偏心距。当机具向内侧转向时,内外两条履带运动方向相同,此时所受阻力最大,当机器重心偏向内侧履带时,由平衡条件可得

$$\begin{cases} F_w = F_{q1} + F_{q2} + F_l \\ F_{q1} = F_{f1} - \frac{M_u}{B_1} \\ F_{q2} = F_{f2} + \frac{M_u}{B_1} \\ F_l = ma \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} F_{f1} = \frac{uF_N}{2} \left(1 - \frac{2E}{B_1} \right) + G \sin \varphi \left(1 - \frac{2E}{B_1} \right) \\ F_{f2} = \frac{uF_N}{2} \left(1 + \frac{2E}{B_1} \right) + G \sin \varphi \left(1 + \frac{2E}{B_1} \right) \\ F_N = G \cos \varphi \\ M_u = M_1 + M_2 = 2 \int_0^{\frac{L_a}{2}} f q x dx \\ q = \frac{F_N}{2L_a} \end{cases} \quad (7)$$

式中 F_w ——机具斜面转向时所需驱动力, N
 F_{q1} ——内侧履带驱动力, N
 F_{q2} ——外侧履带驱动力, N
 F_{f1} ——内侧履带所受阻力, N
 F_{f2} ——外侧履带所受阻力, N
 M_u ——履带底盘所受转向阻力矩, N·m
 B_1 ——履带中心距, m
 F_l ——机具爬坡时的惯性力, N

m ——机具质量, kg
 a ——机具前进方向加速度, m/s^2
 u ——滚动阻力系数, 松软土地取 0.1^[23]
 G ——机具所受重力, N
 F_N ——机具对斜坡正压力, N
 E ——横向偏心距, m
 M_1 ——内侧履带所受转向阻力矩, N·m
 M_2 ——外侧履带所受转向阻力矩, N·m
 q ——单位履带长度上的负荷, N/m
 f ——转向阻力系数, 松软土地取 0.5^[23]
 x ——单侧履带支撑面上任何一点到其转动中心的距离, m
 L_a ——履带接地长度, m
 φ ——爬坡坡度, ($^\circ$)

遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机在作业过程中匀速行驶, 且速度较慢, 因此忽略惯性力 F_l 影响, 装置满载质量 m 为 80 kg, 履带中心距 B_1 为 0.41 m, 履带接地长度 L_a 为 0.56 m, 爬坡坡度 φ 取 30° , 纵向偏心距为 0 ~ 0.09 m, 横向偏心距为 0 ~ 0.205 m, 代入式(6)、(7)求得机具斜面转向时所需驱动力 F_w 为 469.28 N。

装置为双轮驱动, 则每个电机所需输出的扭矩、功率、转速为

$$\begin{cases} P = \frac{1}{9.55} T_m n \\ T_m = \frac{F_w R_w S_A}{N \eta i} \\ n = \frac{30 v i (1 + \gamma)}{\pi R_w} \end{cases} \quad (8)$$

式中 T_m ——电机驱动力矩, N·m
 P ——电机输出功率, W
 R_w ——驱动轮节圆半径, m
 i ——蜗轮蜗杆减速器减速比
 η ——电机传动效率, 取 0.95^[24]
 n ——驱动电机转速, r/min
 S_A ——过载安全系数, 取 1.1^[24]
 γ ——履带滑移率, 取 10%^[25]
 N ——驱动轮数量

驱动轮节圆半径 R_w 为 0.085 m, 采用涡轮蜗杆减速器减速比 i 为 30, 代入式(8)计算得满足坡道上转向运动时所需电机驱动力矩 T_m 为 0.77 N·m, 电机最大输出功率 P 为 239.14 W, 所需电机最大转速 n 为 2 965.90 r/min。综合以上分析, 选择履带底盘驱动电机的功率为 400 W、最大输出力矩为 2.2 N·m、最大转速为 3 000 r/min。

3.3 控制系统设计

遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机控

制系统包括控制程序和执行硬件,图 10 为装置主程序的流程图,主控制器通过解析输入信号,将其转换为控制指令,驱动硬件执行工作内容,完成装置行驶、喷雾、路况可视三大功能。

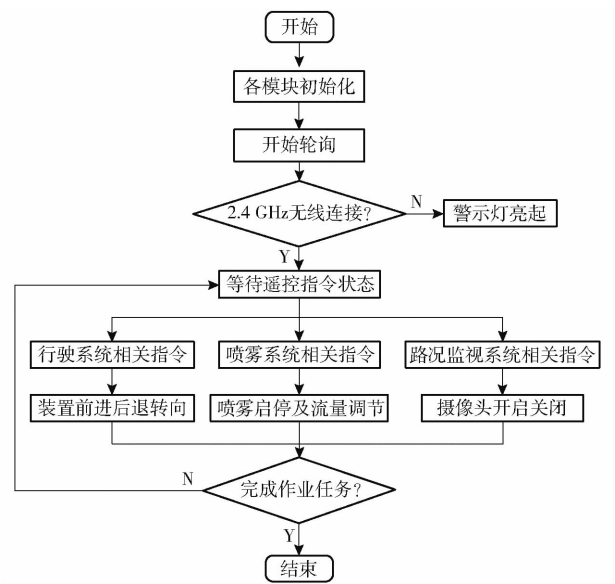


图 10 主控制流程图
Fig. 10 Main control flow chart

图 11 为控制系统的硬件组成图,主要包括电源、控制面板、主控制器、驱动装置和执行单元 5 部分,其中电机驱动器、降压电调直接由 48 V 锂电池供电,变压器将锂电池输出的 48 V 直流电转为 12 V 直流电为继电器供电,12 V 转 5 V 模块为单片机和接收机供电。遥控器指令信号通过 2.4 GHz 频道传输,根据 PWM 通信协议,信号接收机将指令传达给

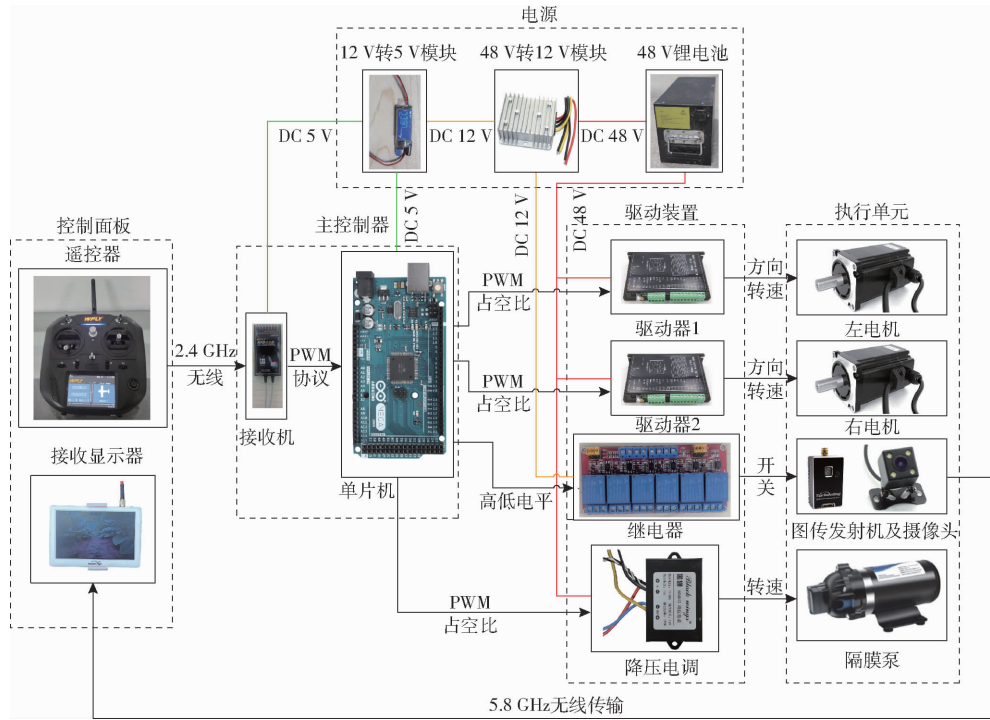


图 11 控制系统硬件组成图
Fig. 11 Hardware composition diagram of control system

Arduino mega 2560 单片机,单片机通过 I/O 接口为喷雾系统、行走系统、路况监视系统提供控制信号。其中单片机输出 PWM 信号的占空比实现喷雾系统流量调节,改变电机转速进而实现泵流量和压力调节。单片机输出 PWM 信号的占空比改变左右直流无刷电机转向和转速,进而控制装置行驶及转向。路况监视系统的开关由单片机输出高低电平控制继电器为摄像头和图传发射机通断电,发射机将摄像头拍摄到图像通过 5.8 GHz 频道传输至接收显示器。

4 场地试验

4.1 参数优化试验

4.1.1 试验因素

为寻求所设计的遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机作业过程中喷雾系统参数的最佳状态,分析喷雾压力、喷嘴间夹角、喷头类型对雪茄烟叶植株中层及下层高度上的雾滴沉积量的影响,以垂直雾滴沉积量为指标^[8],试验因素编码如表 2 所示,运用 Box – Behnken Design 进行试验设计与分析。

4.1.2 试验方法

试验仪器有测量雾滴垂直分布情况的意大利 AAMS 公司 BV – 20 – 400 型垂直雾滴分布测量仪, HT625A 型数字式风速计测量风速、温度以及空气湿度,卷尺、角度测量尺等。

测试场地在武汉市华中农业大学工科基地,气温为 30 ~ 35℃,空气相对湿度为 48% ~ 56%,环境风速为 0 ~ 0.7 m/s。每次试验时,将喷雾机装满水,

表 2 试验因素编码

Tab.2 Factors and codes

编码	因素		
	喷雾压力/MPa	喷嘴夹角/(°)	喷嘴孔径/mm
-1	0.40	19	0.3
0	0.60	21	0.4
1	0.80	23	0.5

安装垂直雾滴分布测量仪。喷雾机与试验台平齐，安装雾滴收集装置,启动喷雾机进行喷雾,同时控制垂直雾滴分布测量仪的行走装置,模拟喷雾机行走速度,当垂直雾滴分布仪器走过喷雾有效范围后,折返回来,确保每组试验的喷雾量相同。将液体收集装置的药液记录,并将收集装置中液体清除,以备下次试验使用。试验场景如图 12 所示。

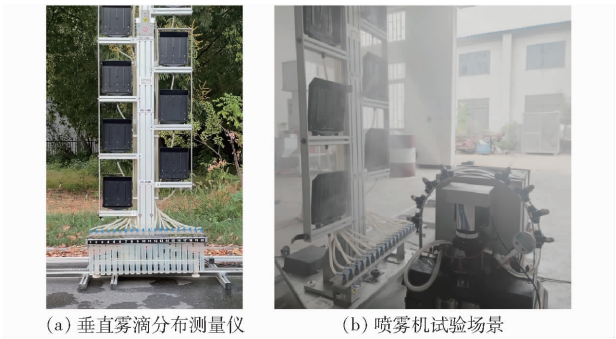


图 12 试验装置与试验场景

Fig.12 Test equipment and test scene

4.1.3 试验结果与分析

根据 Box – Behnken Design 中心组合设计三因素三水平分析试验,共进行 17 组试验,试验方案及结果如表 3 所示,A、B、C 为因素编码值。

表 3 试验方案与结果

Tab.3 Design and results of experiment

序号	因素			雾滴沉积量 Y/mL
	A	B	C	
1	-1	-1	0	130
2	1	-1	0	134
3	-1	1	0	80
4	1	1	0	108
5	-1	0	-1	94
6	1	0	-1	94
7	-1	0	1	129
8	1	0	1	145
9	0	-1	-1	98
10	0	1	-1	58
11	0	-1	1	142
12	0	1	1	108
13	0	0	0	155
14	0	0	0	158
15	0	0	0	152
16	0	0	0	154
17	0	0	0	150

利用 Design-Expert 12.0 对试验结果进行多元回归拟合分析,雾滴沉积量回归方程方差分析见表 4。

表 4 雾滴沉积量回归方程方差分析

Tab.4 ANOVA of regression equation of droplet deposition

来源	平方和	自由度	均方	F	p
模型	14 584.46	9	1 620.50	146.75	<0.000 1 **
A	288.00	1	288.00	26.08	0.001 4 **
B	2 812.50	1	2 812.50	254.69	<0.000 1 **
C	4 050.00	1	4 050.00	366.75	<0.000 1 **
AB	144.00	1	144.00	13.04	0.008 6 **
AC	64.00	1	64.00	5.80	0.047 *
BC	9.00	1	9.00	0.815 0	0.396 6
A ²	756.04	1	756.04	68.46	<0.000 1 **
B ²	3 161.09	1	3 161.09	286.26	<0.000 1 **
C ²	2 610.57	1	2 610.57	236.40	<0.000 1 **
残差	77.30	7	11.04		
失拟项	40.50	3	13.50	1.47	0.349 9
纯误差	36.80	4	9.20		
总和	14 661.76	16			

注: ** 表示差异极显著 ($p < 0.01$), * 表示差异显著 ($0.01 \leq p < 0.05$)。

由表 4 可知,雾滴沉积量 Y 回归模型 $p < 0.01$,失拟项 p 为 0.349 9,说明模型极显著;其中对雾滴沉积量的影响,A、B、C、AB、AC、A²、B²、C²的 p 均小于 0.05,说明各参数影响显著,模型校正后决定系数 R_a^2 为 0.987 9,表明模型拟合良好。对回归模型进行求解,得出雾滴沉积量回归模型为

$$Y = 153.8 + 6A - 18.75B + 22.5C + 6AB + 4AC - 13.4A^2 - 27.4B^2 - 24.9C^2 \quad (9)$$

4.1.4 最优参数确定

为获得所设计的遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机作业过程中喷雾系统参数的最优参数组合,根据装置实际作业条件及设计要求,建立目标约束函数

$$\begin{cases} Y = 153.8 + 6A - 18.75B + 22.5C + 6AB + 4AC - 13.4A^2 - 27.4B^2 - 24.9C^2 \\ \max Y(A, B, C) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq A \leq 1 \\ -1 \leq B \leq 1 \\ -1 \leq C \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

求解因素最优组合水平参数,得出当喷雾压力为 0.65 MPa、喷嘴夹角为 20.4°、孔径 0.4 mm 喷嘴时,雾滴沉积量最优值为 163 mL。

4.2 不同高度雾滴分布试验

为验证最优参数组合下,喷雾机施药作业药液在

不同高度叶片上的沉积量分布合理性,开展不同高度雾滴分布试验,试验方法同上。为减少试验误差,设计 9 组平行试验,试验序号记为 T1 ~ T9。垂直分布仪收集高度为 20 cm,有效收集高度为 0 ~ 1.2 m,共 6

个单元,试验结果如表 5 所示。收集单元 1 ~ 2、3 ~ 5、6 分别对应雪茄烟株下层、中层、上层区段的叶片,将各区段对应的雪茄烟叶高度区间与各采集单元雾滴沉积量进行对应,结果如图 13 所示。

表 5 雾滴沉积分布情况
Tab. 5 Distribution of droplet deposition

高度/m	雾滴沉积量/mL									平均值/ mL
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	
0 ~ 0.2	38	38	40	39	42	38	41	43	41	40.00
0.2 ~ 0.4	45	46	44	45	48	48	47	49	48	46.67
0.4 ~ 0.6	33	35	33	36	35	35	37	38	34	35.11
0.6 ~ 0.8	27	26	27	25	24	27	28	23	27	26.00
0.8 ~ 1.0	13	11	11	13	12	12	11	10	12	11.67
1.0 ~ 1.2	5	5	7	7	8	7	5	8	7	6.56
总计	161	161	162	165	169	167	169	171	169	166

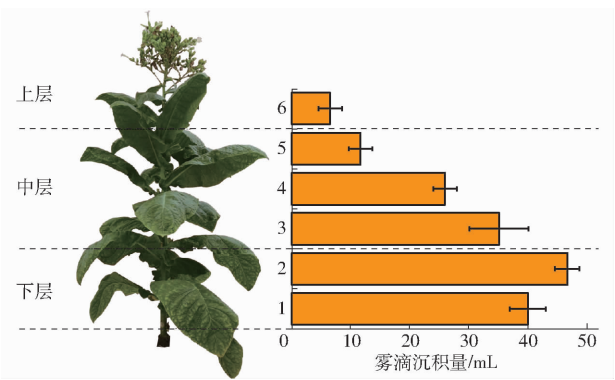


图 13 各冠层与采集单元沉积量对比

Fig. 13 Canopies at different heights and droplet deposition-gained from each collection unit

由表 5 可知,上、中、下层区段的雾滴沉积量在垂直方向上分布平均值分别为 32.80、121.33、216.67 mL/m,雾滴沉积量由大到小为下层、中层、上层,其主要原因为雾滴抵抗重力做斜抛运动,致使下层的雾滴沉积量大于上层。雾滴沉积量垂直分布满足雪茄烟叶植株植保要求,实现了烟叶易生虫害的中层和下层叶片多喷,上层叶片较少且易于使用无人机喷施农药,可以少喷或不喷的作业要求。

5 田间试验

5.1 试验条件与过程

为验证喷雾系统的实地施药作业效果,在湖北省丹江口市优质雪茄烟叶原料生产基地、湖北省武汉市洪山区华中农业大学雪茄烟叶种植基地烟田进行田间试验,参照文献[26]。采用水敏纸检测雾滴情况,HT625A 型数字式风速计测量风速、温度以及空气相对湿度。

以 CX-14 品种雪茄植株为试验对象,株距

0.45 m、行距 1.2 m,植株高度 1.6 ~ 1.7 m。环境温度 30 ~ 34.0℃,环境相对湿度 54.5% ~ 63.5%,环境风速 1 ~ 2 级,最大风速 1.37 m/s。田间作业情况如图 14 所示。



图 14 遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机田间试验

Fig. 14 Field experiments of sprayer spraying for middle and lower tobacco leaves

喷雾机作业时保持前进速度 0.6 m/s、喷雾压力为 0.65 MPa,喷嘴对称布置,单侧相邻夹角 20.4°,喷嘴孔径为 0.4 mm。在同一垄沟两侧分别选取 3 株叶片规整、叶片繁茂的靶标植株,左右间隔取样,防止植株距离太近相互干扰,取样方式如图 15 所示,沿着雪茄烟叶植株高度方向 1 ~ 17 片叶正反面均粘贴水敏纸并标记,水敏纸均靠近叶片中部,且与主茎方向一致。

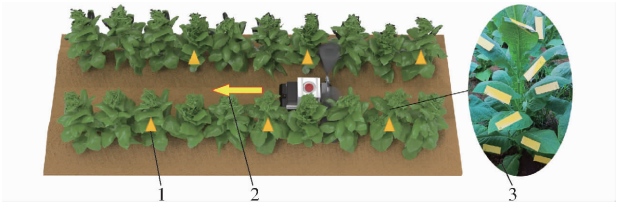


图 15 采样点选取示意图

Fig. 15 Schematic point arrangement

1. 靶标雪茄烟叶 2. 机具前进方向 3. 水敏纸放置

图 16 为喷雾后水敏纸,尺寸为 35 mm × 110 mm,雾滴附着后呈蓝紫色斑点。施药后将附着雾滴的水敏纸干燥后收集在密信封中。

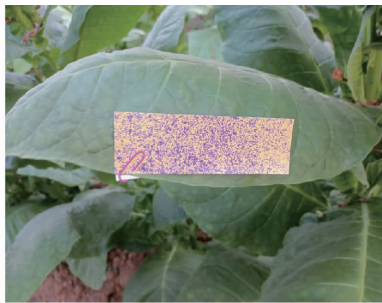


图 16 装置作业后水敏纸显示结果

Fig. 16 Water sensitive test paper sample after spraying

5.2 试验结果分析

采用雾滴覆盖率评价喷雾效果^[27-29],将试验后采集的水敏纸扫描成 PNG 格式的图像进行处理,经区域选取、阈值调节、降噪等步骤之后,分析出药液覆盖率,结果如图 17 所示,其中 1~9 为下层烟叶,10~15 为中层烟叶,16~17 为上层烟叶。

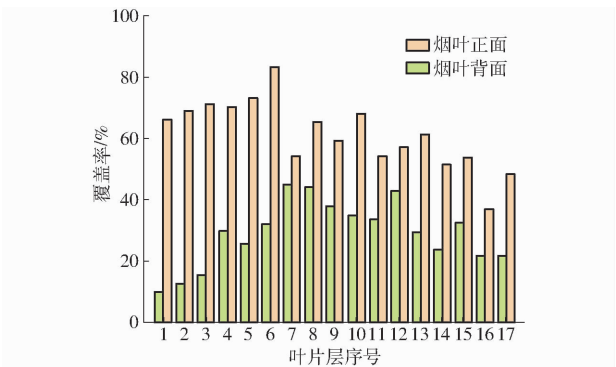


图 17 叶片正反面雾滴覆盖率

Fig. 17 Coverage rates of droplets on front and back sides of leaves

结果表明,作业速度为 0.6 m/s 时,雪茄植株中下层烟叶正面药液覆盖率为 52%~83%,背面药液覆盖率为 22%~45%,其中单次作业雪茄烟叶的 1~15 片叶正面均能得到较好的施药效果,药液覆盖率达到 50%;由于 1~3 层叶片较大且下垂接近地面,很大程度上阻挡了药液在其背面的喷施,而其余叶片叶柄角 θ 随着叶片层数从下至上线性递减,叶片背面逐渐展露,该现象得到缓解,但由于中层以上叶片喷施到的药量较少,由此背

面覆盖率从下往上到中层区间呈先递增后递减趋势,4~15 片叶背面的药液覆盖率均在 20% 以上,遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机作业后雪茄烟叶上雾滴覆盖率由大到小为上层、中层、下层、叶片背面、叶面正面。试验符合文献^[30],可实现喷雾施药的有效覆盖。作业质量高于农业航空作业质量技术指标^[31]。有效解决了无人机作业时药液无法穿透高郁闭度冠层导致中下层叶片上药液附着率低的问题。

6 结论

(1) 针对雪茄烟叶在旺长期及成熟期因植株高大及叶片生长致使烟田垄间空间较小,且田间管理要求不能损伤烟叶,导致生产中雪茄烟叶植株中下层烟叶植保困难的问题,结合雪茄烟叶种植农艺和株型特征,设计了遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机,整机主要由喷雾系统、履带底盘、控制系统组成,结构紧凑,可靠性强,可实现雪茄烟叶中层及以下叶片植保。

(2) 对喷雾系统、履带底盘行走系统及控制系统进行了设计,确定了 8 个喷嘴对称布局形式且各个喷嘴处的沿程损失小,喷嘴流量变异系数 C_{vQ} 为 0.15%,履带底盘宽度为 420 mm,高度为 265 mm,履带底盘驱动电机功率为 400 W、最大输出力矩为 1.2 N·m、最大转速为 3 000 r/min。开展场地试验,得出当喷雾压力为 0.65 MPa、喷嘴夹角为 20.4°、采用孔径 0.4 mm 喷嘴时,雾滴沉积量最优值为 163 mL,且雾滴沉积量由大到小为下层、中层、上层,满足雪茄烟叶植保要求。

(3) 田间试验结果表明,当作业速度为 0.6 m/s 时,雪茄植株中下层烟叶正面药液覆盖率为 52%~83%,背面药液覆盖率为 22%~45%,遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机作业效果良好,其中在中下层的 1~15 层雪茄烟叶正面药液覆盖率高 于 50%,1~3 片叶靠近地面导致背面覆盖率低,4~15 片叶背面覆盖率从下往上呈先增大后减小的趋势,均大于 20%,装置作业后雪茄烟叶上雾滴覆盖率由大到小为上层、中层、下层、叶片背面、叶面正面,满足设计要求。

参 考 文 献

[1] 杜文斌,杨春雷,杨锦鹏,等.雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(1):116-126,295.
DU Wenbin, YANG Chunlei, YANG Jinpeng, et al. Design and experiment of cigar tobacco adjustable seed-plot ridging and film spreading machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 116-126, 295. (in Chinese)

[2] 王琰琰,刘国祥,向小华,等.国内外雪茄烟主产区及品种资源概况[J].中国烟草科学,2020,41(3):93-98.
WANG Yanyan, LIU Guoxiang, XIANG Xiaohua, et al. Overview of main cigar production areas and variety resources at

- domestic and overseas[J]. Chinese Tobacco Science, 2020, 41(3): 93–98. (in Chinese)
- [3] 方鑫, 卢文彪, 赵忠清, 等. 叶片式雪茄烟自动入盒生产线的设计[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(6): 95–99.
FANG Xin, LU Wenbiao, ZHAO Zhongqing, et al. Design and research of automatic boxing production line of the rane crigars [J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(6): 95–99. (in Chinese)
- [4] 苑进, 赵新学, 李明, 等. 高地隙喷杆式与隧道式一体喷雾机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 2): 60–68.
YUAN Jin, ZHAO Xinxue, LI Ming, et al. Design and test of high clearance boom-tunnel type sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 2): 60–68. (in Chinese)
- [5] 樊桂菊, 牛成强, 张震明, 等. 多气流协同式果园 V 形防飘喷雾装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 138–147.
FAN Guiju, NIU Chengqiang, ZHANG Zhenming, et al. Design and experiment of V-shaped orchard anti-drift spray device with multi-airflow cooperation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 138–147. (in Chinese)
- [6] 姜红花, 白鹏, 刘理民, 等. 履带自走式果园自动对靶风送喷雾机研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 189–195.
JIANG Honghua, BAI Peng, LIU Limin, et al. Caterpillar self-propelled and air-assisted orchard sprayer with automatic target spray system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 189–195. (in Chinese)
- [7] 姜红花, 牛成强, 刘理民, 等. 果园多风管风送喷雾机风量调控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 298–307.
JIANG Honghua, NIU Chengqiang, LIU Limin, et al. Design and experiment of air volume control system of orchard multi-pipe air sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 298–307. (in Chinese)
- [8] 李建平, 边永亮, 杨欣, 等. 果园多风机风送喷雾机作业参数优化与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(10): 2474–2485.
LI Jianping, BIAN Yongliang, YANG Xin, et al. Operational parameter optimization and testing of an air-assisted multi-fan orchard sprayer[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(10): 2474–2485. (in Chinese)
- [9] 周良富, 傅锡敏, 丁为民, 等. 组合圆盘式果园风送喷雾机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 64–71.
ZHOU Liangfu, FU Ximin, DING Weimin, et al. Design and experiment of combined disc air-assisted orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 64–71. (in Chinese)
- [10] 周良富, 张玲, 薛新宇, 等. 3WQ-400 型双气流辅助静电果园喷雾机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 45–53.
ZHOU Liangfu, ZHANG Ling, XUE Xinyu, et al. Design and experiment of 3WQ-400 double air-assisted electrostatic orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 45–53. (in Chinese)
- [11] ENDALEW A M, DEBAER C, RUTTEN N, et al. Modelling pesticide flow and deposition from air-assisted orchard spraying in orchards: a new integrated CFD approach[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(10): 1383–1392.
- [12] PARTEL V, COSTA L, AMPATZIDIS Y. Smart tree crop sprayer utilizing sensor fusion and artificial intelligence[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 191.
- [13] CHEN L Q, WANG P P, ZHANG P, et al. Performance analysis and test of a maize inter-row self-propelled thermal fogger chassis citation[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(5): 100–107.
- [14] 王伟伟, 谢进杰, 陈黎卿, 等. 3YZ-80A 型履带自走式玉米行间喷雾机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 106–114.
WANG Weiwei, XIE Jinjie, CHEN Liqing, et al. Design and experiment of 3YZ-80A crawler self-propelled corn interrow sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 106–114. (in Chinese)
- [15] 刘路, 杨路, 高观光, 等. 小型烟草植保机移动平台结构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 156–162.
LIU Lu, YANG LU, GAO Guanguang, et al. Structural design and test of wheeled tobacco plant protection mobile platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 156–162. (in Chinese)
- [16] 沈跃, 何思伟, 刘慧, 等. 高地隙喷雾机自转向电动底盘控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 385–392.
SHEN Yue, HE Siwei, LIU Hui, et al. Modeling and control of self-steering electric chassis structure of high clearance sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 385–392, 402. (in Chinese)
- [17] 兰玉彬, 张海艳, 文晟, 等. 静电喷雾雾化特性与沉积效果试验分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 130–139.
LAN Yubin, ZHANG Haiyan, WEN Sheng, et al. Analysis and experiment on atomization characteristics and spray deposition of electrostatic nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 130–139. (in Chinese)
- [18] 边永亮, 李建平, 薛春林, 等. 单旋翼油动无人机与圆形果园风送喷雾机作业性能对比试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(12): 134–141.
BIAN Yongliang, LI Jianping, XUE Chunlin, et al. A comparative study on the performance of single-rotor oil-propelled UAV and circular air-fed orchard sprayer[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(12): 134–141. (in Chinese)
- [19] 金瑾, 刘焕芳, 王亚朦. 沿程泄流多孔管道出流能力计算[J]. 中国农村水利水电, 2017(2): 150–153.
JIN Jin, LIU Huanfang, WANG Yameng. The flow calculation on the porous pipe[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(2): 150–153. (in Chinese)

[20] RAVIKUMAR V, RANGANATHAN C R, SANTHANA BOSU S. Analytical equation for variation of discharge in drip irrigation laterals[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003,129(4): 295 – 298.

[21] 刘伟,汪小岳,丁为民,等. 背负式喷雾器变量喷雾控制系统设计与特性分析[J]. 农业工程学报,2012,28(9):16 – 21. LIU Wei, WANG Xiaochan, DING Weimin, et al. Design and characteristics analysis of variable spraying control system for knapsack sprayer[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(9):16 – 21. (in Chinese)

[22] 卢鑫羽,龚艳,陈晓,等. 电动履带式立式喷杆喷雾机设计与试验[J]. 中国农机化学报,2021,42(8):83 – 91. LU Xinyu, GONG Yan, CHEN Xiao, et al. Design and experiment of electric crawler vertical boom sprayer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021,42(8): 83 – 91. (in Chinese)

[23] 迟媛. 履带车辆差速转向技术与理论[M]. 北京:化学工业出版社,2013.

[24] 张青松,齐涛,廖庆喜,等. 农田耕后地表微地貌自走遥控测量装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023,54(4): 73 – 82,119. ZHANG Qingsong, QI Tao, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of farmland surface micro-landform measuring device after rapeseed planter seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(4):73 – 82,119. (in Chinese)

[25] 李文哲,许绮川. 汽车拖拉机学(第 2 册)[M]. 北京:中国农业出版社,2006.

[26] JB/T 9782—2014 植物保护机械通用试验方法[S]. 2014.

[27] 蒋焕煜,周鸣川,李华融,等. PWM 变量喷雾系统动态雾滴分布均匀性实验[J]. 农业机械学报, 2015,46(3): 73 – 77. JIANG Huanyu, ZHOU Mingchuan, LI Huarong, et al. Experiment on dynamic droplet distribution uniformity for PWM variable spray system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(3):73 – 77. (in Chinese)

[28] 李民赞,李欣泽,杨玮,等. 无人机喷雾质量检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021,52(增刊):36 – 42. LI Minzan, LI Xinze, YANG Wei, et al. Design and eperiment of UAV spray quality detection system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(Supp.):36 – 42. (in Chinese)

[29] 曲峰,盛希宇,李熙,等. 3WZF – 400A 型果园风送喷雾机改进设计[J]. 农业机械学报, 2017,48(增刊): 15 – 21. QU Feng, SHENG Xiyu, LI Xi, et al. Improved design of 3WZF – 400A orchard air-assisted sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(Supp.):15 – 21. (in Chinese)

[30] GB/T 40331.2—2021 植物保护机械 大田作物喷雾沉积量的测试 第 2 部分:在作物上的测试[S].2021.

[31] MH/T 1002.1—2016 农业航空作业质量技术指标 第 1 部分:喷洒作业[S].2016.

(上接第 121 页)

[20] 赵章凤,张立彬,汪晓华,等. 茶叶圆筛条件分析与过程数值模拟[J]. 茶叶科学,2014,34(1):1 – 8. ZHAO Zhangfeng, ZHANG Libin, WANG Xiaohua, et al. Condition analysis and numerical simulation of tea plane circular sieve [J]. Journal of Tea Science, 2014, 34(1): 1 – 8. (in Chinese)

[21] 王成军,章天雨,郑艳,等. 两自由度往复式滚筒筛茶叶筛分模拟研究[J]. 茶叶科学,2016,36(6):613 – 620. WANG Chengjun, ZHANG Tianyu, ZHENG Yan, et al. Simulation study on the screening of the reciprocating roller screen with two degrees of freedom for tea[J]. Journal of Tea Science,2016,36(6):613 – 620. (in Chinese)

[22] LUO K, CAO C, WU Z, et al. Optimization of roasted green tea winnowing via fluid-solid interaction experiments and simulations[J]. Foods,2022, 11: 3271.

[23] CROSS R. Oblique impact of a steel ball[J]. Powder Technology, 2019,351: 282 – 290.

[24] 刘鹏,何进,章志强,等. 基于 CFD – DEM 的秸秆还田机碎秆运动特性分析与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 1):244 – 253. LIU Peng, HE Jin, ZHANG Zhiqiang, et al. Kinematic characteristic analysis and field test of chopped stalk in straw retention machine based on CFD – DEM coupling simulation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp. 1):244 – 253. (in Chinese)

[25] GAO Yunpeng, SONG Lianglai, WANG Lijun, et al. Behavior of maize particles on the bionic sieve designed based on the earthworm’s contour[J]. Powder Technology,2022,403:117399.

[26] WANG Jinwu, XU Changsu, XU Wenlong, et al. Discrete element method simulation of rice grain motion during discharge with an auger operated at various inclinations[J]. Biosystems Engineering, 2022,223(24): 97 – 115.

[27] JB/T 5676—2007 茶叶抖筛机[S]. 2007.

[28] 王小勇,余志,倪德江. 往复式茶叶振动抖筛机优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(9):143 – 153. WANG Xiaoyong, YU Zhi, NI Dejiang. Optimization design and experiment of reciprocating tea vibrating-sifting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(9):143 – 153. (in Chinese)